干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

伊犁山区雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)不同树干高度树木径向生长特征及其对气候响应

刘可祥[1]， 张同文[1]， 张瑞波[1]， 喻树龙[1]， 黄力平[2]， 姜盛夏[1]， 胡东宇[2]
（1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所中国气象局树木年轮理化研究重点实验室/新疆树木年轮生态实验室，新疆 乌鲁木齐 830002；2. 新疆林业科学院现代林业研究所，新疆 乌鲁木齐 830000）

摘　要：采集新疆伊犁地区雪岭云杉（*Picea schrenkiana*）1.3 m、5 m、10 m、15 m、20 m和25 m树干高度树轮样本并研制其树轮宽度年表。通过相关分析得出不同树干高度树木径向生长对气候要素的响应关系及其稳定性，并计算出不同气象因子的相对贡献率和绝对贡献率。结果表明：(1) 不同树干高度具有相似的径向生长变化特征，且平均气温和降水量的影响主要表现为各树干高度树轮宽度与当年9月降水量的显著负相关，与上年11月平均气温的显著正相关，并且5 m至25 m树干高度处还受当年7月降水量的影响。(2) 通过贡献率量化各树干高度气象因子影响情况，1.3 m和5 m树干高度的主要影响因子是平均气温，而10 m、15 m、20 m和25 m树干高度的主要影响因子则是降水量。(3) 滑动相关分析得到各树干高度对气候变化响应的稳定性存在差异，主要表现为各树干高度处与上年12月平均气温相关性减弱，与当年6月平均气温相关性先增强后减弱，与上年9月平均气温负相关性增强；1.3 m至15 m树干高度与当年9月降水量负相关性增强，10 m至25 m树干高度与当年1月降水量相关性减弱。通过分析不同树干高度树木径向生长与气候要素的关系，有助于了解各树干高度树木径向生长与气候响应的差异，为开展更精确的气候重建提供参考。

关 键 词：雪岭云杉；树木年轮；树干高度；径向生长；气候响应
文章编号：

树木年轮以其定年准确、空间覆盖广、易于获取等特点被广泛应用于全球气候变化研究中，对分析过去百年至千年气候变化具有重要意义[1-4]。由于在树干胸高处采集树芯样本较为便利，并且一般认为这一位置的树轮宽度对树木总体径向生长具有一定代表性[5]。因此，以往树轮分析大多基于胸高处树轮样本开展气候响应及重建研究。但有研究表明，自身状况、自然环境、生理条件等因素会对树干产生影响，从而使不同树干高度的径向生长产生差异[6-9]。此外，不同树干高度树木径向生长对气候要素的响应关系有所不同。Zhang等[10]发现雪岭云杉（*Picea schrenkiana*）10 m树干高度树轮宽度对气候要素的响应敏感度高于其他树干高度。刘可祥等[11]将雪岭云杉各树干高度密度与气候资料进行相关分析得到，树干15 m处树轮最大密度和晚材平均密度与上年生长季中后期和当年生长季平均气温具有较好的响应。张雪等[12]对长白山红松（*Pinus koraiensis*）的研究发现，各树干高度径向生长对气象因子的响应也存在明显差异。总体而言，基于不同树干高度开展树木生长气候响应分析总体较少，且工作仅针对一个树轮采样点和有限的样本量，相关研究尚未扩展至区域层面。

同时，据IPCC（2021）报道，受全球气候变暖的影响，北半球增温现象明显。气候变化的加剧致使北半球高纬度地区部分树木径向生长对于气候的响应表现不稳定，导致森林中不同空间区域、海拔

收稿日期：2021-10-19；　**修订日期**：2021-11-10
基金项目：第二次青藏高原综合科学考察研究子专题（2019QZKK010206）；中国沙漠气象科学基金（Sqj2020003）；国家自然科学基金项目（41975095）；天山青年计划—杰出青年科技人才项目（2019Q007）资助
作者简介：刘可祥（1992-），男，助理研究员，主要从事树木年轮气候学研究. E-mail: liukx@idm.cn
通讯作者：喻树龙（1977-），男，副研究员，主要从事树木年轮气候学研究. E-mail: yushl@idm.cn

梯度，同一树种的径向生长模式产生差异[13-18]。针对气候变暖背景下树木径向生长对气候变化的动态响应问题，众多学者围绕圆柏(*Juniperus seravschanica*)、落叶松(*Larix sibirica*)、红松(*Pinus koraiensis*)等树种在不同区域开展了相关研究[19-22]。研究内容涉及不同海拔、坡向、不同树种间对比等，但同一树种不同树干高度间树轮-气候动态响应状况研究目前仍相对有限。

天山地处中亚干旱区，气候变化波动大，对全球变化响应敏感，区域内分布有大量雪岭云杉等长龄且对气候敏感的针叶树种，因此是树轮气候研究的理想区域。以往在天山开展的树轮研究成果所涉及树轮参数包括宽度、密度和同位素等[23-28]，但上述研究多是使用树干胸高处样本开展。

基于上述研究背景，同时瞄准天山树轮-气候研究薄弱领域，团队赴新疆伊犁地区对雪岭云杉开展多点采样，建立区域代表性更强的不同树干高度树轮宽度年表。计划开展树木生长气候响应研究，以期深入了解雪岭云杉不同树干高度树木径向生长与气象因子的关系及其响应稳定性的情况，尝试更为全面地揭示天山雪岭云杉径向生长规律。

1 材料与方法

1.1 样本采集与处理

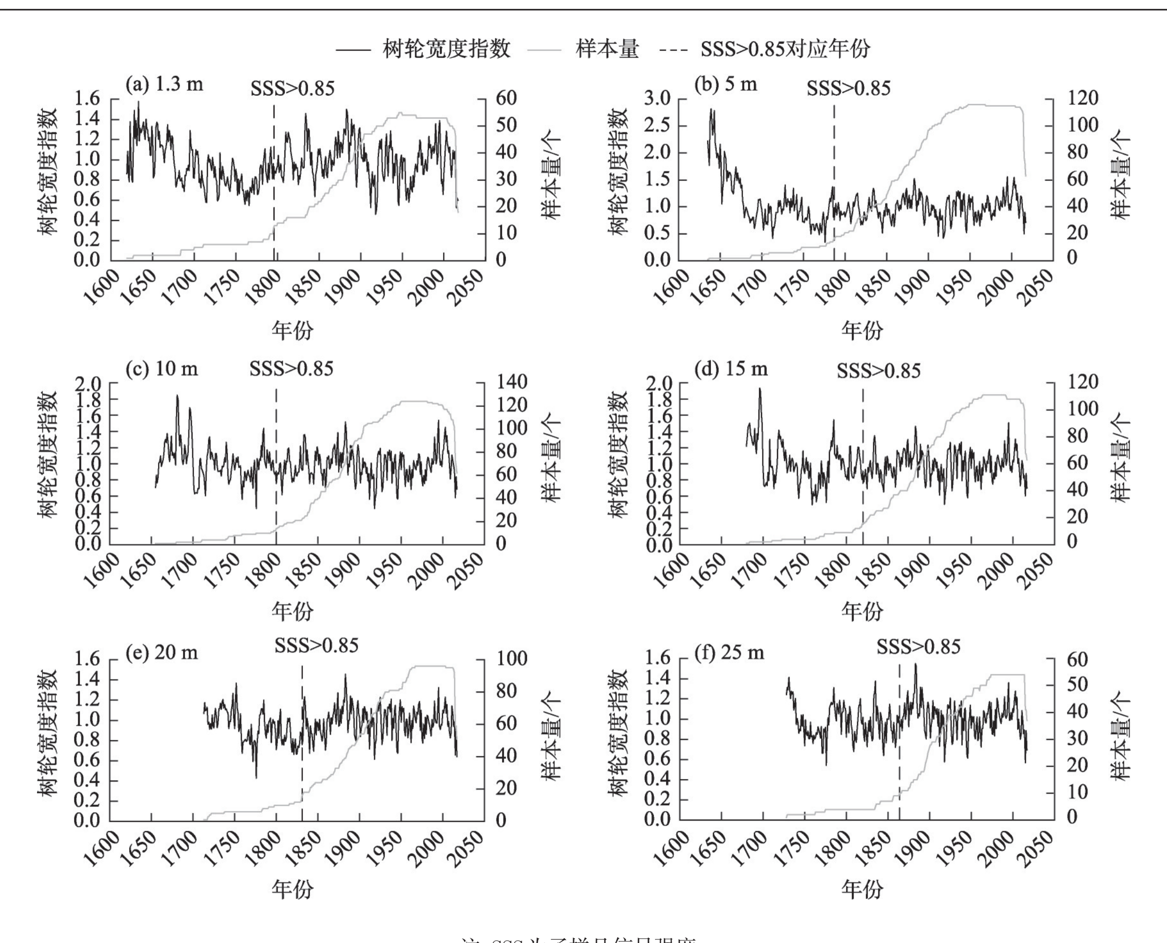
研究区域位于天山西部伊犁地区特克斯县、巩留县境内山区。伊犁地区整体地势由东向西倾斜，且呈向西敞开的喇叭形状，西南开口低平。这种独特地形阻挡了北冰洋寒流以及东北、东南方向的干冷干热气流，敞开的西面却利于接纳大西洋、地中海等水域西风带暖气流贯入整个河谷，且随地势抬高而降水递增。使得该区既具有中温带大陆气候的基本特点，又具有较为温和湿润的“塞外江南”气候特色[29]。区域山地植被的垂直地带性分异规律明显，其中山地针叶林带以雪岭云杉为主，主要在1600~2700 m中山带的阴坡和半阴坡，属常绿耐阴抗寒树种，森林土壤为山地灰褐色森林土[30]。分别于2017年6月和2018年5月进行采样，样树采集高度为1.3 m、5 m、10 m、15 m、20 m、25 m、30 m、35 m、40 m、45 m和50 m，主要采集风倒木树木样本，每个高度采集2个树样，其中2017年共从105棵样树采集172个树轮圆盘，2018年共从57棵样树采集563根树轮样芯。同时在风倒木周边采集健康立木样芯以辅助定年。所采样芯的预处理严格按照树木年轮学的基本原理和步骤进行[31]，待样芯自然风干后进行粘芯、磨平、打光及目测定年。使用LINTAB 6.0树木年轮宽度测量系统进行树轮宽度测量；利用国际年轮库COFECHA交叉定年质量控制程序进行交叉定年[32]，利用ARSTAN程序建立树轮宽度年表。因样本量的限制，分别建立1.3 m、5 m、10 m、15 m、20 m和25 m树高树轮标准化宽度年表(图1)，并针对上述年表开展研究。

1.2 气候资料

在利用树木年轮进行历史气候研究过程中，树轮年表与气象因子间的相关分析是衡量该年表能否反映气候信息的关键[30]。本文所使用的气象数据资料为特克斯县(43°10′48″N，81°46′12″E)、巩留县(43°28′12″N，82°13′48″E)和新源县(43°27′N，83°18′E)3个气象站点1961—2014年逐月降水量和逐月平均气温数据(图2、图3)。研究区降水量主要集中在5—6月，占全年降水量的29.83%；最冷月份为1月(-9.01 ℃)，气温最高月份为7月(20.60 ℃)。

1.3 研究方法

通过将测得的各树干高度树轮宽度标准年表与气象因子(逐月降水量和月平均气温)进行相关分析，确定气象因子对雪岭云杉径向生长的影响情况。同时，为了量化雪岭云杉与平均气温和降水量的关系，将每个树干高度中相关系数最高月份的平均气温和降水量进行多元回归分析，建立1.3 m、5 m、10 m、15 m、20 m和25 m树干高度的多元回归模型($y=\beta_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\varepsilon$，式中$y$为各树干高度标准化树轮宽度指数，$x_1$、$x_2$为各树干高度年表相关最显著月份的平均气温和降水量，β_0为截距，β_1、β_2分别为平均气温和降水量的回归系数，ε为误差项)。为进一步分析平均气温和降水量对各树干高度径向生长的贡献率，对多元回归模型中的平均气温、降水量因子使用“relaimpo”包计算绝对贡献率(因子的绝对贡献率之和为R^2，可以反映各因子对径向生长的解释量)和相对贡献率(因子的相对贡献率之和为100%，可以反映因子的重要性情况)，确定平均气温和降水量在不同树干高度的绝对贡献率，以及各树干高度平均气温和降水量的相对贡献率[33-34]。此外，以固定开始年份向后滑动的方法，计算雪岭云杉不同树干高度树轮宽度年表与气象因子间的相



注：SSS为子样品信号强度。

图1 不同树干高度树轮宽度指数及样本量

Fig. 1 Tree-ring width index and sample size at different trunk heights

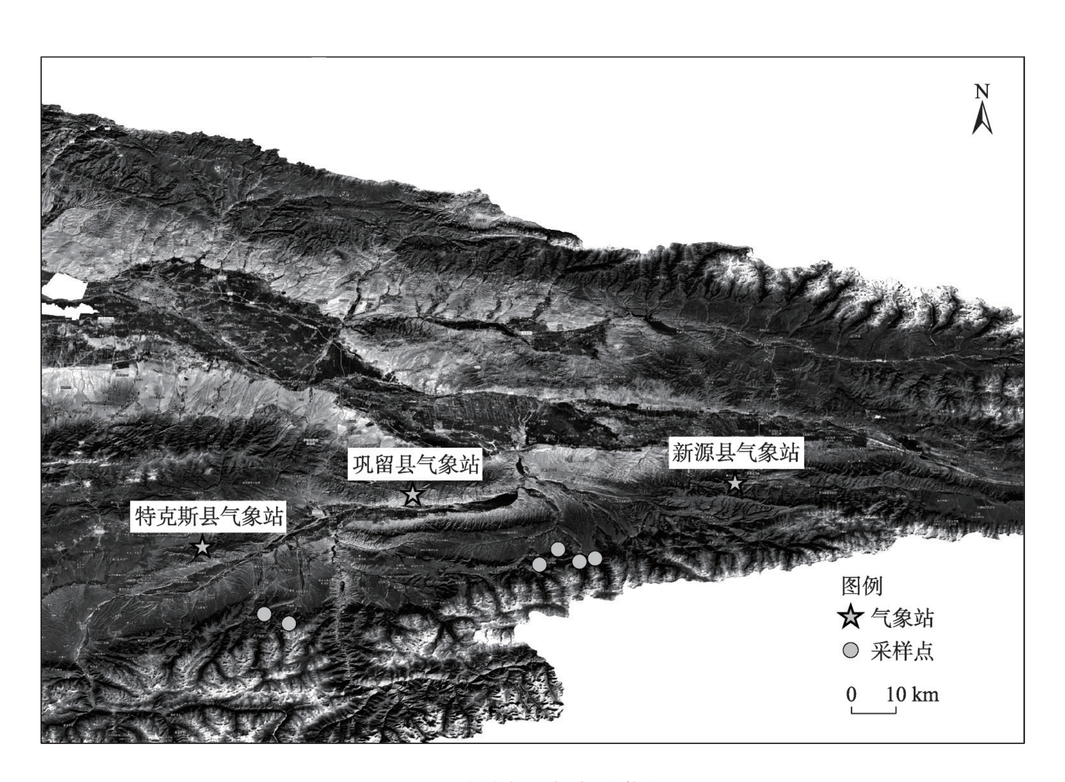


图2 采样点及气象站信息

Fig. 2 Map of the tree-ring sampling sites and meteorological stations in this study

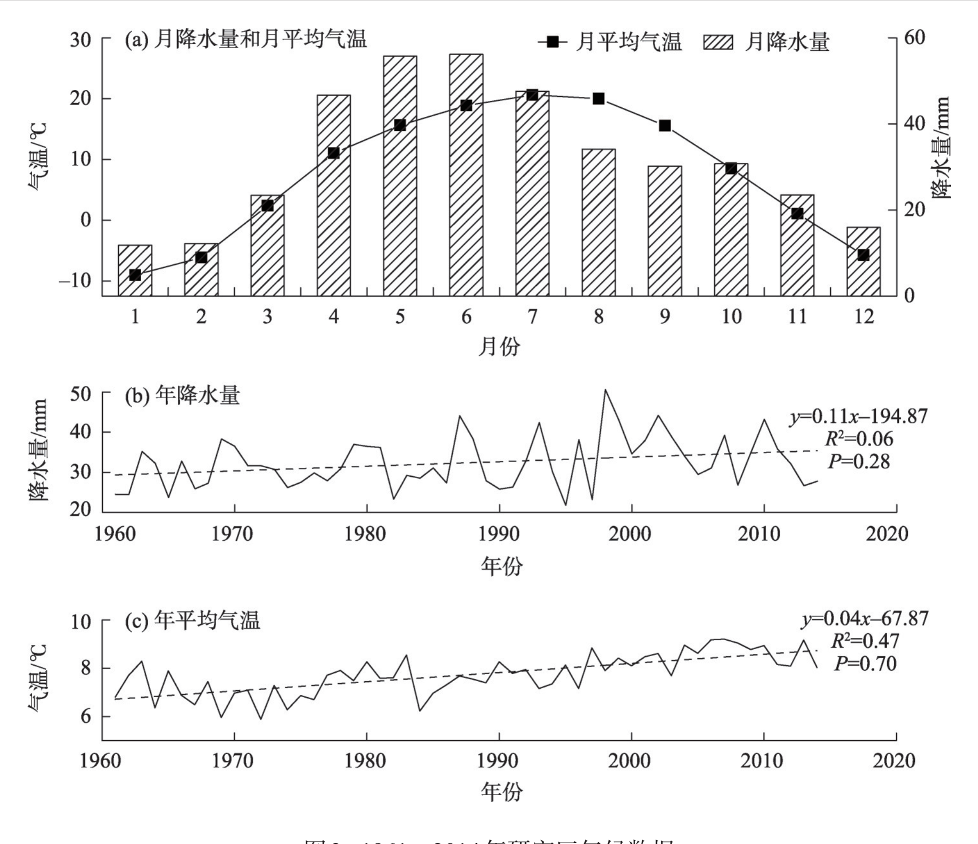


图3　1961—2014年研究区气候数据

Fig. 3　Climatic data in study area from 1961 to 2014

关系数，对各树干高度树木径向生长与气象因子之间关系的稳定性进行评估(滑动窗口30 a)。

2　结果与分析

2.1　不同树干高度树轮年表分析

由表1可得1.3 m至25 m树干高度树轮年表参数统计特征。年表中，可信年表长度最长的为5 m树干高度(230 a)，最短的为25 m树干高度(153 a)。6个树干高度树轮宽度年表一阶自相关系数介于0.558~0.846，表明6个树干高度树木当年径向生长明显受到上一年径向生长的影响。信噪比是气候信号与非气候信号因素形成的噪音比值[35]，信噪比越大，年表中含有的气候信息越多，表中信噪比介于10.714~37.714，说明各树干高度年表都含有较强的环境信息。样本对总体的代表性都达到0.9以上，表明各树干高度年表序列对总体的代表性较好，年表质量较高。

将1.3 m至25 m树干高度标准树轮宽度年表进行互相关分析(表2)。各树干高度宽度年表相关性较好，最低为1.3 m与20 m树干高度的0.759，最高为5 m与10 m树干高度的0.977。通过分析发现，各

表1　不同树干高度树轮年表统计特征

Tab. 1　Statistical characteristics of tree-ring chronologies at different trunk heights

树高/m	样本量	一阶自相关系数	第一特征向量百分比	树间平均相关系数	信噪比	样本对总体的代表性/%	标准差	平均敏感度	年表长度/a (SSS>0.85)
1.3	54	0.742	0.274	0.203	10.714	0.915	0.211	0.124	221
5	116	0.846	0.287	0.217	26.421	0.964	0.365	0.155	230
10	124	0.671	0.319	0.273	37.714	0.974	0.205	0.134	217
15	111	0.678	0.252	0.212	24.576	0.961	0.216	0.144	197
20	96	0.558	0.277	0.231	22.801	0.958	0.155	0.122	186
25	54	0.558	0.322	0.269	14.884	0.937	0.166	0.129	153

注：SSS为子样品信号强度。

表2　不同树干高度年表相关系数

Tab. 2　Correlation coefficients among the tree-ring chronologies at different trunk heights

树高/m	1.3 m	5 m	10 m	15 m	20 m	25 m
1.3	1.000					
5	0.885**	1.000				
10	0.859**	0.977**	1.000			
15	0.858**	0.935**	0.947**	1.000		
20	0.759**	0.861**	0.883**	0.938**	1.000	
25	0.812**	0.882**	0.902**	0.931**	0.923**	1.000

注：**表示$P<0.01$。下同。

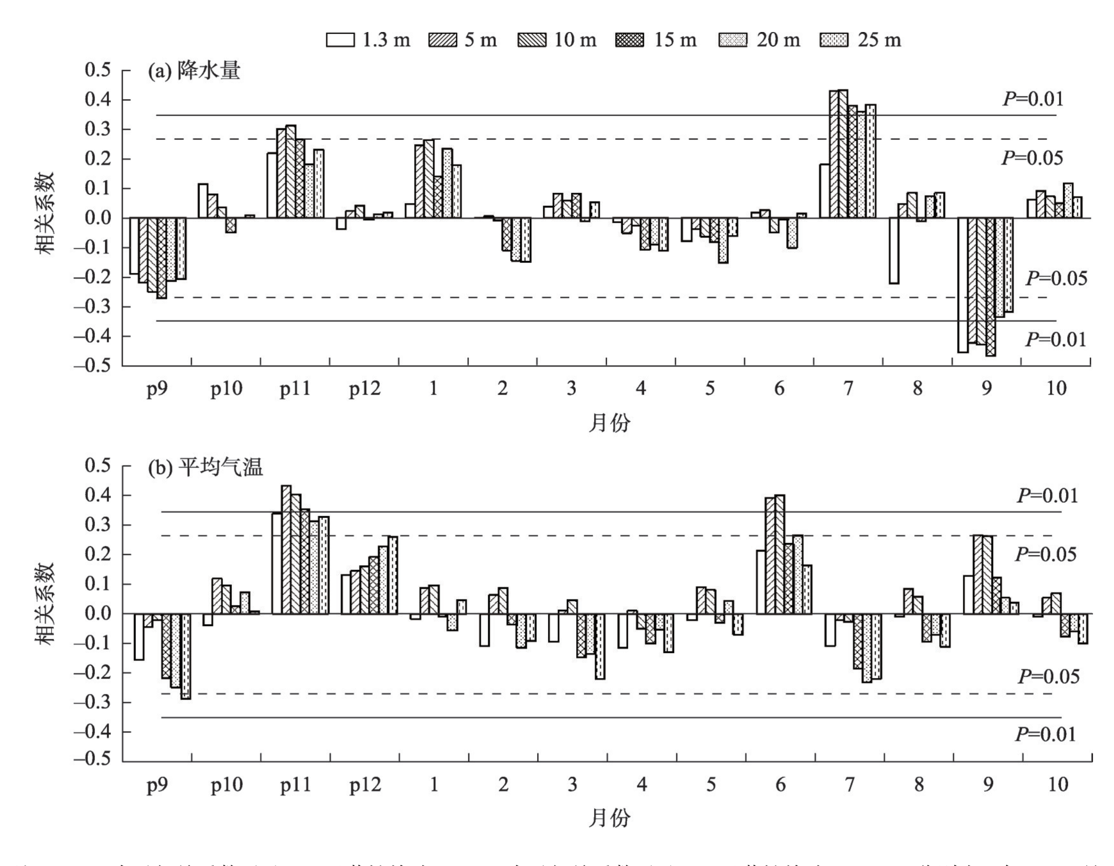
树干高度与相邻更高树干树轮年表进行相关分析时，都表现为与相邻高度相关性最好。

2.2　各树干高度树轮宽度年表与气象因子的相关分析

研究表明，秋、冬季气象因子对树木年轮生长具有滞后效应[29]，因此选取上年9月至当年10月的气象因子进行响应及稳定性分析(图4)。在各树干高度与降水量的相关分析中，主要表现为各树干高度与当年9月降水量呈显著负相关，5 m至25 m树干高度与当年7月降水量呈显著正相关，以及5 m和10 m树干高度与上年11月降水量呈显著正相关，15 m树干高度与上年9月降水量呈显著负相关，各树干高度与降水量的响应具有较好的统一性。在与平均气温的相关分析中发现，各树干高度树木径向生长主要受到上年11月平均气温的影响。另外，当年6月平均气温对5 m、10 m树干高度树木径向生长具有促进作用，上年9月平均气温与25 m树干高度呈显著负相关(r=−0.288, P<0.05)。综合分析，5 m至25 m树干高度径向生长主要受到当年7月和9月降水量及上年11月平均气温的影响，1.3 m树干高度主要受到当年9月降水量和上年11月平均气温的影响。

2.3　平均气温和降水量对各树干高度树木径向生长的贡献

为探明树木径向生长与气象因子在不同树干高度上的影响机制，选择对各树干高度影响最大的对应平均气温和降水量月份，构建多元回归模型(表3)。可得，平均气温与各树干高度相关月份最



注：P=0.05表示相关系数通过0.05显著性检验；P=0.01表示相关系数通过0.01显著性检验。p9~p12分别为上年9—12月。

图4　不同树干高度树轮年表与气候数据相关分析

Fig. 4　Pearson correlations among tree-ring chronologies at different trunk heights and climatic data

表3　平均气温和降水量对树木径向生长的多元回归参数

Tab. 3　Estimates of the multiple linear model for the effect of precipitation and mean temperature on the radial growth

树高/m	气候变量	月份	斜率	t	P	R^2
1.3	平均气温	p11	0.014	1.533	*	0.065
	降水量	9	−0.001	−0.863	**	
5	平均气温	p11	0.030	2.868	**	0.299
	降水量	7	0.003	2.813	**	
10	平均气温	p11	0.025	2.566	**	0.281
	降水量	7	0.003	2.871	**	
15	平均气温	p11	0.021	2.542	**	0.301
	降水量	9	−0.004	−3.553	**	
20	平均气温	p11	0.012	1.806	*	0.181
	降水量	7	0.002	2.276	**	
25	平均气温	p11	0.014	1.934	*	0.208
	降水量	7	0.002	2.503	**	

注：t为对回归参数的显著性检验值；P为显著性水平；R^2为方差解释量；*表示P<0.05，**表示P<0.01。

大的都为上年11月，具有较好的统一性；降水量与1.3 m和15 m树干高度相关最大月份为当年9月，5 m、10 m、20 m和25 m树干高度为当年7月。各树干高度平均气温与降水量对树木径向生长变异的解释量不同，1.3 m至25 m树干高度依次为0.065、0.299、0.281、0.301、0.181和0.208。同时，通过计算得到各树干高度多元回归模型中平均气温、降水量的相对贡献率、绝对贡献率(图5)。相对贡献率方面，1.3 m树干高度上年11月平均气温和当年9月的降水量贡献率分别为72.02%和27.98%，5 m树干高度上年11月平均气温和当年7月降水量贡献率分别为50.73%和49.27%，10 m树干高度上年11月平均气温和当年7月降水量贡献率分别为45.74%和54.26%，15 m树干高度上年11月平均气温和当年9月降水量贡献率分别为35.69%和64.31%，20 m树干高度上年11月平均气温和当年7月降水量贡献率分别为41.35%和58.65%，25 m树干高度上年11月平均气温和当年7月降水量贡献率分别为40.37%和59.63%。绝对贡献率方面，平均气温的绝对贡献率在1.3 m树干高度处为4.67%，5 m树干高度处为15.14%，10 m树干高度处为12.85%，15 m树干高度处为10.74%，20 m树干高度处为7.50%，25 m树干高度处为8.39%；降水量的绝对贡献率在1.3 m树干高度处为1.82%，5 m树干高度处为14.71%，

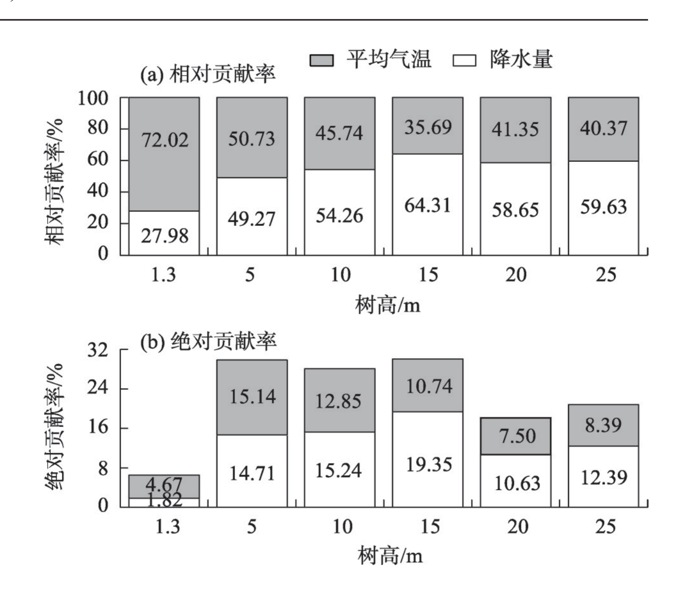


图5　平均气温和降水量对树木径向生长的相对贡献率、绝对贡献率

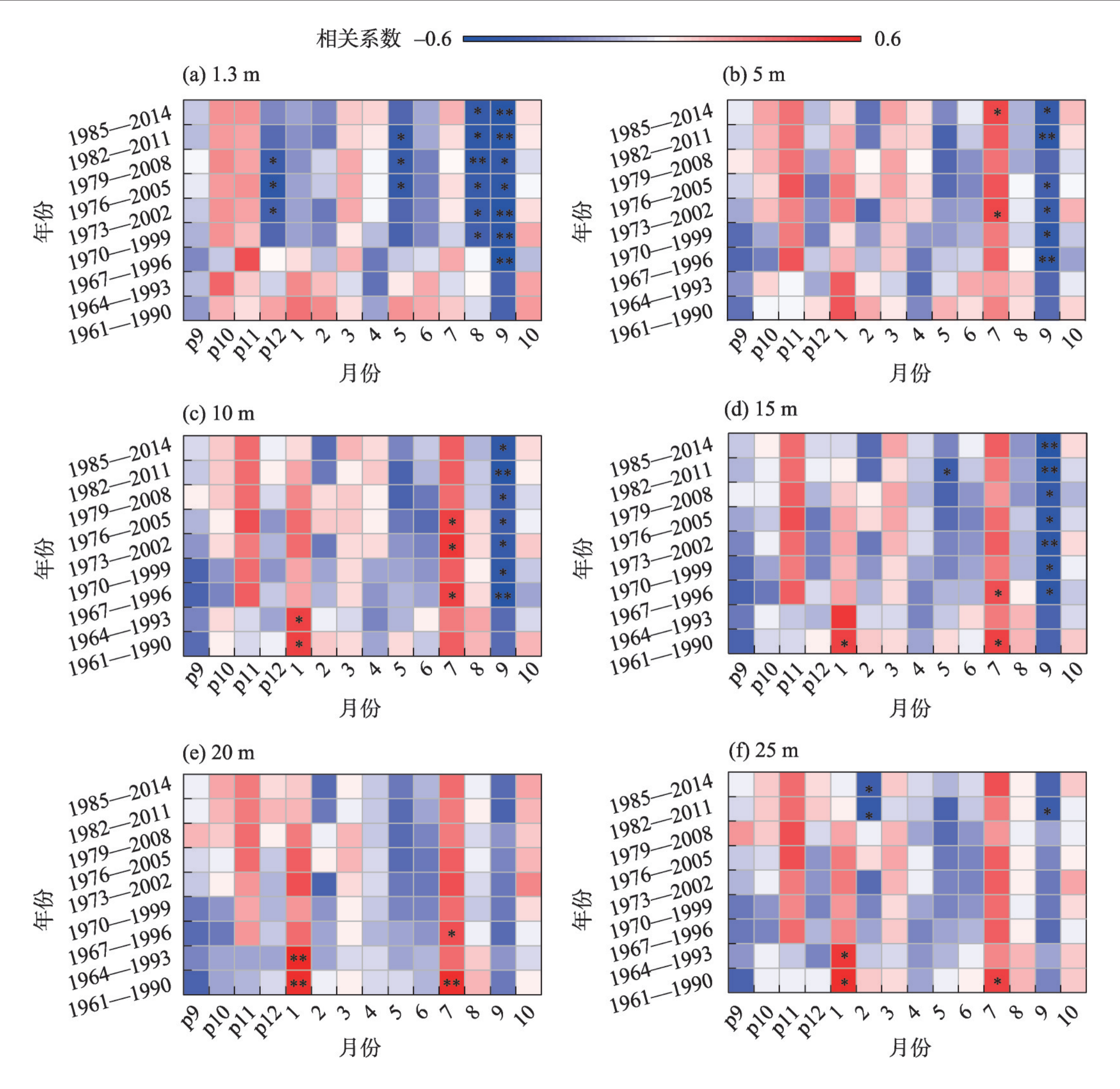
Fig. 5　Relative contribution rate and absolute contribution rate of mean temperature and precipitation

10 m树干高度处为15.24%，15 m树干高度处为19.35%，20 m树干高度处为10.63%，15 m树干高度处为12.39%。通过上述分析可得，1.3 m和5 m树干高度处平均气温的相对贡献率、绝对贡献率高于降水量；随着树干高度增加，降水量的贡献率高于平均气温。

2.4　各树干高度树轮宽度与气象因子的滑动相关分析

通过滑动相关分析可得，雪岭云杉不同树干高度树木径向生长对气候变化响应发生动态变化(图6、图7)。1.3 m树干高度与上年12月、当年5月和当年8月降水量的滑动相关结果由正相关转为负相关，且从1970年代开始表现为显著负相关，与当年9月降水量负相关逐渐显著。5 m至15 m树干高度与当年9月降水量负相关，且从1960年代后期开始显著负相关，同时5 m至25 m树干高度与当年7月降水量都表现出相关不稳定情况，10 m至25 m树干高度与当年1月降水量显著正相关逐渐减弱为不相关。

各树干高度与平均气温的滑动相关显示(图7)，各树干高度与上年9月平均气温负相关增强，并最终(1985—2014年)表现为显著负相关。上年11月平均气温在5 m、10 m和20 m树干高度显著正相关增强，并在1970年中期表现为显著正相关(P<0.05)。各树干高度与上年12月平均气温相关性逐



注:*表示 $P<0.05$;**表示 $P<0.01$。下同。

图6 雪岭云杉不同树干高度树轮宽度年表与降水量的滑动相关分析

Fig. 6 Moving correlation between the tree-ring chronologies at different trunk heights of *Picea schrenkiana* and precipitation

渐减弱。当年6月平均气温与各树干高度的滑动相关从1961—1990年开始相关性逐渐增强,并在1967—1996年段开始表现出显著正相关,并最终(1985—2014年)转换为非显著相关关系。

3 讨论

3.1 基于点-面开展不同树干高度树木径向生长-气候关系对比分析

通过分析可得,雪岭云杉(1.3 m至25 m)树木径向生长受到平均气温和降水量的共同影响。Zhang等[10]基于单点开展的雪岭云杉不同树干高度与气象因子关系研究中,各树干高度(1.3 m至20 m)与上年11月平均气温显著正相关、与当年9月降水量显著负相关,本研究得到与之相同的结果。由点至面的研究表明,天山西部雪岭云杉不同树干高度树木径向生长受该气象情况影响。从树木生理角度而言,冬季较高的气温能够促进树木的正常代谢活动,为树木来年的生长奠定基础。反之,冬季气温过低使树木受到寒冻,影响其来年光合作用,从而制约其径向生长。到了9月,气温降低,云量增大致使太阳辐射减弱,树木光合作用速率下降,且较多的降水量进一步阻碍有机物的合成和积累,不利于树木的径向生长,从而表现出显著负相关关系[36-37]。同时,Zhang等[10]的研究中当年6月平均气温对5 m至20 m树干高度显著正相关,但与1.3 m树干高度没有显著相关性;本研究中当年6月平均气温与5 m、10 m树干高度显著正相关,与1.3 m树干高度同样没有显著关系,两者的研究具有相似结果。除此

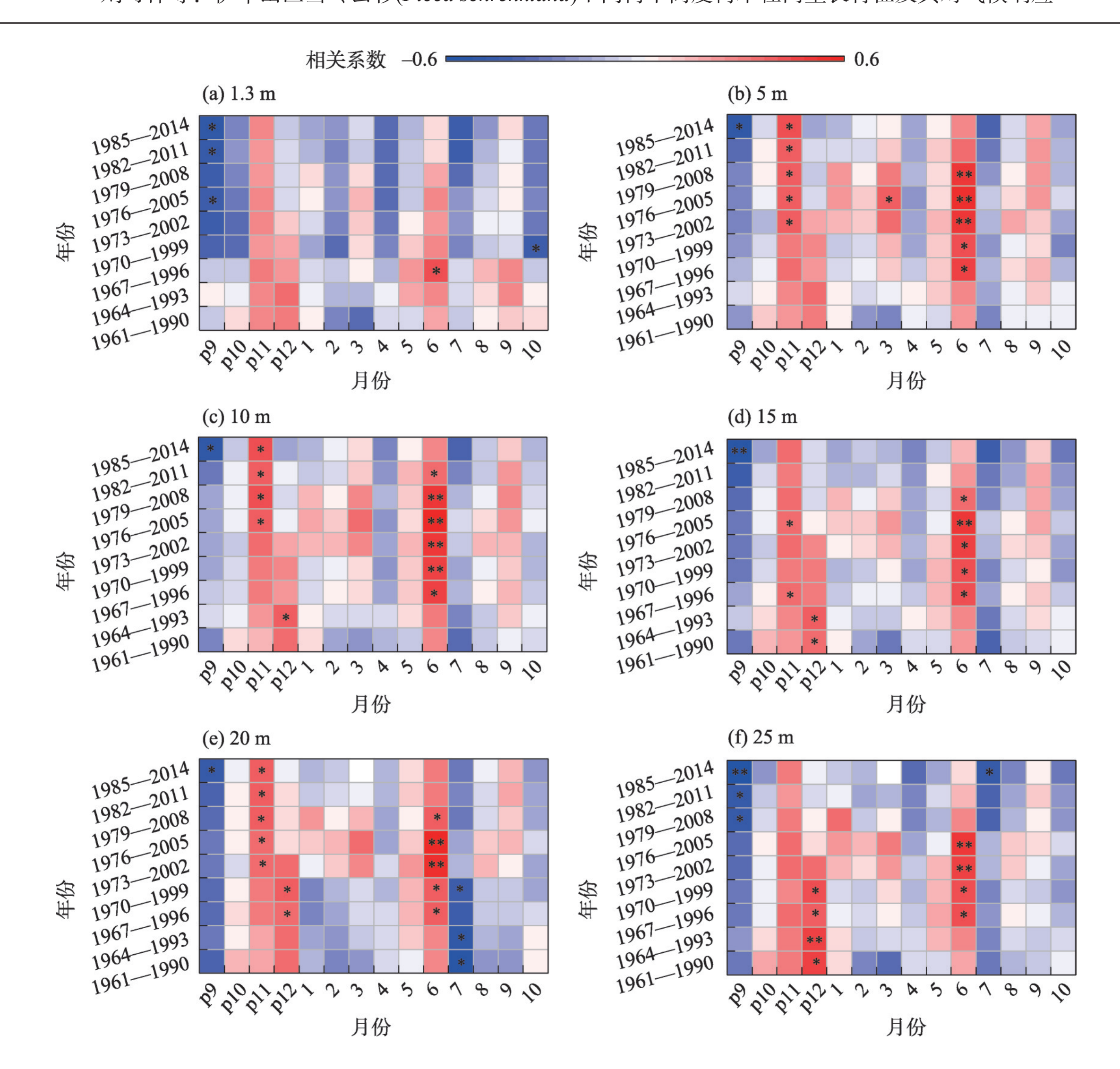


图7　雪岭云杉不同树干高度树轮宽度年表与平均气温的滑动相关分析

Fig. 7　Moving correlation between the tree-ring chronologies at different trunk heights of *Picea schrenkiana* and mean temperature

之外，本研究中各树干高度与气象因子的相关中主要表现为当年7月降水量与5 m至25 m树干高度极显著正相关，但与1.3 m树干高度没有显著相关性。当年7月降水量与树木径向生长呈显著正相关关系，主要是夏季水热条件对树木径向生长起着重要作用，丰富的降水量能够保证土壤含水率，促进树木进行光合作用，为植物组织提供良好的生理代谢环境[37−40]。而生长季时期的气温和降水量(当年6月平均气温、当年7月降水量)与1.3 m树干高度没有显著关系的可能原因推测是受树木郁闭度影响，陈景玲等[41]研究得出树冠的遮荫有降温的作用，如果减少高温危害，减少蒸发力，相当于增加了自然降水。1.3 m树干高度处气温低于其他树高，没有达到树木生长的气候条件，从而造成上述结果，但具体事实需要进一步验证。

3.2　不同树干高度平均气温、降水量贡献率差异分析

通过分析平均气温和降水量的相对贡献率、绝对贡献率可知，天山雪岭云杉不同树干高度树木径向生长受到平均气温和降水量的影响不一致。1.3 m和5 m树干高度平均气温的贡献率高于降水量，表明该树干高度树木生长受平均气温限制比树干更高处强；10 m树干高度及更高树干处降水量的贡献率高于平均气温，表明随着树干高度的上升，降水量对树木径向生长的促进作用增强，张雪等[12]针对长白山红松的研究中也得出相似结论。一般认为，森林上限区域气温是树木径向生长的限制因子，森林下限降水量是树木生长的主要限制因子，

但海拔梯度对于树木生长的差异性与以整根树干作为一个独立整体开展气候研究是不同的概念。基于管道模型假说,树干是由单位数量的管道集合成束而形成,管道即是水分输导的器官,并且还起到机械支撑的作用[42]。整个树干水分运移过程中,随着树干高度的增加,水分径向扩散能力下降,同时有研究表明水分在针叶树纵向输送过程中呈逆时针方向螺旋式上升[43],水分由基部向上输送过程中阻力增大,使顶部水分相对减少;水分亏缺的条件下,植物叶片气孔关闭以减少蒸腾作用,降低植物光合速率[44-45]。水分在输送过程中,基部相较于其他树干位置具有较充沛的水分含量,此时气温的上升能够促进其径向生长;水分向上运移且逐渐减少的过程中,降水逐渐成为影响其他树干生长的关键限制因子。

3.3 雪岭云杉不同树干高度树木径向生长对气候变化的动态响应

通过对雪岭云杉各树干高度与气象因子的滑动相关分析可得,各树干高度树木径向生长对气候变化产生了不同程度的动态响应,但各树干高度的响应程度不同。各树干高度与当年6月平均气温敏感性在近年来降低,该结论与焦亮等[20]开展阿尔泰山西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)径向生长对气候变化的分异响应结果相一致。全球气候变暖致使北半球高纬度地区气温升高,气温对树木生长的限制逐渐降低。同时,上年9月平均气温的敏感性增强(负相关性增强),即平均气温升高树木生长受到抑制,研究区自1976年起降水量出现下降[0.21 mm·(10a)$^{-1}$],从而出现因干旱致使树木生长受到抑制的情况。上年12月平均气温与各树高的滑动相关总体上表现为逐渐降低的趋势,即平均气温对树木径向生长的促进作用减弱。数据分析显示,1965年起上年12月平均气温以0.14 ℃·a^{-1}的速度下降。有学者研究表明,冬季低温是植物细胞形成的驱动因子,秋冬季的低温对于打破芽休眠具有重要作用,之后的春季偏高温度能够促进植物芽的生长[46-47]。滑动相关显示,1.3 m至15 m树干高度与当年9月降水量敏感性增强(并转换为显著负相关关系),说明当年9月降水量对树木径向生长有抑制作用。9月处于树木生长的末期,此时气温降低,太阳辐射减弱,不利于树木进行光合作用,因而表现出负相关关系。

4 结论

雪岭云杉不同树干高度具有相似的径向生长特征,且1.3 m至25 m树干高度树木径向生长受平均气温和降水量的共同影响。具体表现为1.3 m至25 m树干高度受当年9月降水量、上年11月平均气温的影响,5 m至25 m树干高度树木径向生长还同时受到当年7月降水量的影响。通过贡献率分析得到,1.3 m和5 m树干高度树木径向生长主要受到平均气温影响,10 m至25 m树干高度主要受到降水量的影响。各树干高度树木径向生长关于气候变化的动态响应存在差异,主要表现为各树干高度与上年12月平均气温相关性减弱,与当年6月平均气温相关性先增强后减弱,与上年9月平均气温负相关性增强;1.3 m至15 m树干高度与当年9月降水量负相关性增强,10 m至25 m树干高度与当年1月降水量相关性减弱。为增加树轮气候响应及重建精度,在野外环境允许情况下,可考虑将更高树干处样本纳入采样范围。通过量化不同树干高度树木径向生长与气象因子的关系,有助于了解各树干高度树木与气候响应的差异,为更准确的进行气候重建提供参考。

参考文献(References)

[1] Cook E R, Anchukaitis K J, Buckley B M, et al. Asian monsoon failure and mega drought during the last millennium[J]. Science, 2010, 328: 486-489.

[2] Shao X, Xu Y, Yin Z Y, et al. Climatic implications of a 3585-year tree-ring width chronology from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Quaternary Science Reviews, 2010, 29: 2111-2122.

[3] Yang B, Qin C, Wang J L, et al. A 3500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan Plateau[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2014, 111: 2903-2908.

[4] 刘禹, 蔡文炬, 孙长峰, 等. 人为气溶胶排放导致最近80年东亚夏季风在过去四个世纪以来空前减弱[J]. 地球环境学报, 2019, 10(6): 527-542. [Liu Yu, Cai Wenju, Sun Changfeng, et al. Anthropogenic aerosols cause recent pronounced weakening of Asian summer monsoon relative to last four centuries[J]. Journal of Earth Environment, 2019, 10(6): 527-542.]

[5] Cook E R, Kairiukstis L A. Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990: 23-35.

[6] Holgèn P, Söderberg U, Hånell B. Diameter increment in *Picea ab-*

ies shelterwood stands in northern Sweden[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2003, 18: 163–167.

[7] Muhairwe C K. Tree form and taper variation over time for interior lodgepole pine[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1994, 24: 1904–1913.

[8] Meng S X, Lieffers V J, Reid D E B. Reducing stem bending increases the height growth of tall pines[J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 57: 3175–3182.

[9] Peltola H, Miina J, Rouvinen I, et al. Effect of early thinning on the diameter growth distribution along the stem of Scots pine[J]. Silva Fenn, 2002, 36: 813–825.

[10] Zhang T W, Huang L P, Zhang R B, et al. The impacts of climatic factors on radial growth patterns at different stem heights in Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*)[J]. Trees, 2020, 34: 163–175.

[11] 刘可祥, 张同文, 张瑞波, 等. 不同树高处树轮密度变化特征及其对气候的响应[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2): 503–512. [Liu Kexiang, Zhang Tongwen, Zhang Ruibo, et al. Characteristics of tree-ring density at different stem heights and their climatic responses[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(2): 503–512.]

[12] 张雪, 高露双, 丘阳, 等. 长白山红松不同树高处径向生长特征及其对气候的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2978–2984. [Zhang Xue, Gao Lushuang, Qiu Yang, et al. Characteristics of Korean pine (*Pinus koraiensis*) radial growth at different heights and its response to climate change on Changbai Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 2978–2984.]

[13] D'Arrigo R, Wilson R, Jacoby G. On the long-term context for late twentieth century warming[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: D303103, doi: 10.1029/2005jd006352.

[14] 方克艳, 陈秋艳, 刘昶智, 等. 树木年代学的研究进展[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 1879–1888. [Fang Keyan, Chen Qiuyan, Liu Changzhi, et al. Research advances in dendrochronology[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(7): 1879–1888.]

[15] 刘国华, 傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响[J]. 自然资源学报, 2001, 16(1): 71–78. [Liu Guohua, Fu Bojie. Effects of global climate change on forest ecosystems[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(1): 71–78.]

[16] D'Arrigo R, Wilson R, Liepert B, et al. On the 'divergence problem' in northern forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes[J]. Global and Planetary Change, 2007, 60: 289–305.

[17] Wilson R, D'Arrigo R, Buckley B, et al. A matter of divergence: Tracking recent warming at hemispheric scales using tree ring data [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2007, 112: D17103, doi: 10.1029/2006JD008318.

[18] Zhang T W, Zhang R B, Jiang S X, et al. On the 'Divergence Problem' in the Alatau Mountains Central Asia: A study of the response of Schrenk spruce tree-ring width to climate under the recent warming and wetting trend[J]. Atmosphere, 2019, 10: 473, doi: 10.3390/atmos10080473.

[19] 苟晓霞, 张同文, 喻树龙, 等. 不同生境下圆柏径向生长的气候响应[J]. 生态学杂志, 2021, 40(6): 1574–1588. [Gou Xiaoxia, Zhang Tongwen, Yu Shulong, et al. Response of radial growth of *Juniperus seravschanica* to climate changes in different environmental conditions[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(6): 1574–1588.]

[20] 焦亮, 王玲玲, 李丽, 等. 阿尔泰山西伯利亚落叶松径向生长对气候变化的分异响应[J]. 植物生态学报, 2019, 43(3): 320–330. [Jiao Liang, Wang Lingling, Li Li, et al. Divergent response of radial growth of *Larix sibirica* to climate change in Altay Mountains of Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(3): 320–330.]

[21] 周子建, 江源, 董满宇, 等. 长白山北坡不同海拔红松径向生长–气候因子关系对气温突变的响应[J]. 生态学报, 2018, 38 (13): 4668–4676. [Zhou Zijian, Jiang Yuan, Dong Manyu, et al. Response of the relationship between radial growth and climatic factors to abrupt change of temperature along an altitudinal gradient on the northern slope of Changbai Mountain, northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): 4668–4676.]

[22] 张赟, 尹定财, 田昆, 等. 玉龙雪山不同海拔丽江云杉径向生长对气候变异的响应[J]. 植物生态学报, 2018, 42(6): 629–639. [Zhang Yun, Yin Dingcai, Tian Kun, et al. Radial growth responses of *Picea likiangensis* to climate variabilities at different altitudes in Yulong Snow Mountains, southwest China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(6): 629–639.]

[23] 秦莉, 尚华明, 张同文, 等. 天山南北坡树轮稳定碳同位素对气候的响应差异[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5713–5724. [Qin Li, Shang Huaming, Zhang Tongwen, et al. Response comparison of the tree-ring $\delta^{13}C$ to climate on the southern and northern slope of Tianshan Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5713–5724.]

[24] 吴燕良, 甘淼, 于瑞德, 等. 基于树轮生理模型的雪岭云杉径向生长的模拟研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 64–71. [Wu Yanliang, Gan Miao, Yu Ruide, et al. Process-based modeling radial growth of *Picea schrenkiana* in the eastern Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 64–71.]

[25] 牛军强, 袁玉江, 张同文, 等. 利用树木年轮重建阿勒泰地区1572—2014年初夏平均温度[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 27–35. [Niu Junqiang, Yuan Yujiang, Zhang Tongwen, et al. Reconstruction of early summer temperature during 1572—2014 from tree-rings in the Altay Prefecture[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 27–35.]

[26] 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 等. 天山山区树轮气候研究若干进展[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(4): 1–9. [Zhang Ruibo, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, et al. Research advances of dendroclimatology in Tianshan Mountains[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2016, 10 (4): 1–9.]

[27] 张同文, 王丽丽, 袁玉江, 等. 利用树轮宽度资料重建天山中段

南坡巴仑台地区过去645年来的降水变化[J]. 地理科学, 2011, 31(2): 251−256. [Zhang Tongwen, Wang Lili, Yuan Yujiang, et al. A 645−year precipitation reconstruction in Baluntai Region on southern slope of mid-Tianshan Mountains based on tree-ring width [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(2): 251−256.]

[28] 张晴, 于瑞德, 郑宏伟, 等. 天山东部不同海拔西伯利亚落叶松对气候变暖的响应分析[J]. 植物研究, 2018, 38(1): 14−25. [Zhang Qing, Yu Ruide, Zheng Hongwei, et al. Response analysis of *Larix sibirica* to climate warming at different elevations in the eastern Tianshan Mountains[J]. Bulletin of Botanical Research, 2018, 38(1): 14−25.]

[29] 喻树龙. 新疆伊犁巩乃斯地区树木年轮密度对气候的响应及气候重建[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2011. [Yu Shulong. Response relationship between tree-ring density and climatic factors and climate reconstruction in Gongnaisi Region of Yili, Xinjiang [D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2011.]

[30] 杜海燕, 常顺利, 宋成程, 等. 天山雪岭云杉森林菌根真菌多样性及其影响因子[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1194−1201. [Du Haiyan, Chang Shunli, Song Chengcheng, et al. Diversity and influence factors of mycorrhizal fungi in *Picea schrenkiana* forests across Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(5): 1194−1201.]

[31] Stokes M A, Smiley T L. An introduction to tree-ring dating[M]. Tucson: University of Arizona Press, 1996: 1−173.

[32] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement[J]. Tree-Ring Bull, 1983, 43: 69−75.

[33] Groemping U. Relative importance for linear regression in R: The package relaimpo[J]. Journal Statistical Software, 2006, 17: 1−27.

[34] 周鹏, 黄建国, 梁寒雪, 等. 不同海拔温度和降水对新疆阿尔泰山西伯利亚落叶松径向生长的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(6): 623−632. [Zhou Peng, Huang Jianguo, Liang Hanxue, et al. Effect of temperature and precipitation on radial growth of *Larix sibirica* along altitudinal gradient on Altay Mountains, Xinjiang, China[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2019, 27(6): 623−632.]

[35] 勾晓华, 邵雪梅, 王亚军, 等. 祁连山东部地区树木年轮年表的建立[J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 234−237. [Gou Xiaohua, Shao Xuemei, Wang Yajun, et al. The establishment of tree-ring chronology in east region of Qilian Mountains[J]. Journal of Desert Research, 1999, 19(4): 234−237.]

[36] 曹仁杰, 尹定财, 田昆, 等. 丽江老君山海拔上限长苞冷杉(*Abies georgei*)和云南铁杉(*Tsuga dumosa*)径向生长对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 6067−6076. [Cao Renjie, Yin Dingcai, Tian Kun, et al. Response of radial growth of *Abies georgei* and *Tsuga dumosa* to climate change at upper distributional limits on Laojun Mountain, Lijiang, Yunnan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 6067−6076.]

[37] 余佳霖, 张卫国, 田昆, 等. 普达措国家公园海拔上限3个针叶树种径向生长对气候变化的响应[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(1): 43−51. [Yu Jialin, Zhang Weiguo, Tian Kun, et al. Response of radial growth of three conifer trees to climate change at their upper distribution limits in Potatso National Park, Shangri-la southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(1): 43−51.]

[38] Rolland C. Tree-ring and climate relationships for *Abies allba* in the internal Alps[J]. Tree-Ring Society, 1993, 53: 1−11.

[39] 赖志华. 长苞铁杉幼苗对极端温度和外源钙的适应与响应机制[D]. 厦门: 厦门大学, 2007. [Lai Zhihua. Response and adaptation mechanism of seedlings of *Tsuga longibracteata* to extreme temperature and extrinsic calcium[D]. Xiamen: Xiamen University, 2007.]

[40] 赵志江, 郭文霞, 康东伟, 等. 川西亚高山岷江冷杉和紫果云杉径向生长对气候因子的响应[J]. 林业科学, 2019, 55(7): 1−16. [Zhao Zhijiang, Guo Wenxia, Kang Dongwei, et al. Response of radial growth of *Abies faxoniana* and *Picea purpurea* to climatic factors in subalpine of western Sichuan[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(7): 1−16.]

[41] 陈景玲, 吴明, 杨喜田. 山毛桃−侧柏混交林对侧柏的荫蔽效应[J]. 河南农业大学学报, 2014, 48(5): 579−584. [Chen Jingling, Wu Ming, Yang Xitian. Microclimate effect of mixed forest *Platycladus orientalis* and *Prunus davidiana* on *Platycladus orientalis* afforestation[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2014, 48 (5): 579−584.]

[42] 刘盛, 张友祥, 李想, 等. 管道模型和树木年轮水分输导模式的理论及在落叶松生产力估测中的应用[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(3): 18−26. [Liu Sheng, Zhang Youxiang, Li Xiang, et al. Application of pipe model and the theory of mater transportation pattern through tree rings in larch productivity estimation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(3): 18−26.]

[43] 刘盛, 宋彩民, 李国伟. 4种林木年轮水分输导模式研究[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(2): 14−18. [Liu Sheng, Song Caimin, Li Guowei. Patterns of water transport in tree rings of four tree species[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(2): 14−18.]

[44] Chaves M M, Flexas J, Pinheiro C. Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell[J]. Annals of Botany, 2009, 103: 551−560.

[45] Ryan M G, Yodar B J. Hydraulic limits to tree height and tree growth[J]. Bioscience, 1997, 47: 235−242.

[46] Chuine I, Morin X, Bugmann H. Warming, photoperiods, and tree phenology[J]. Science, 2010, 329: 277−278.

[47] Hänninen H, Kramer K, Tanino K, et al. Experiments are necessary in process-based tree phenology modelling[J]. Trends in Plant Science, 2019, 24: 199−209.

Characteristics of radial growth at different trunk heights of *Picea schrenkiana* and its climate response in the mountainous area of the Ili Region

LIU Kexiang[1], ZHANG Tongwen[1], ZHANG Ruibo[1], YU Shulong[1], HUANG Liping[2], JIANG Shengxia[1], HU Dongyu[2]

(1. Xinjiang Laboratory for Tree Ring Ecology, Key Laboratory of Treering Physical and Chemical Research of China Meteorological Administration, Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 2.Institute of Modern Forestry, Xinjiang Academy of Forestry Science, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: To analyze the radial growth characteristics at different trunk heights of *Picea schrenkiana* and the influence of meteorological elements on radial growth at each trunk height and the stability to combat climate change, we collected tree ring samples from different trunk heights (1.3 m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, and 25 m) of *Picea schrenkiana* and examined the development of tree ring width chronologies in Ili Region, Xinjiang. Based on the correlation analysis, we conclude that the response relationship of radial growth at different trunk heights and its stability. Then, we computed the relative and absolute contribution rates of meteorological elements. The findings show the following. (1) The radial growth patterns are similar at different trunk heights, and it is jointly influenced by temperature and precipitation. All tree trunk heights had a significantly positive correlation with the September precipitation of the current year and the November temperature of the previous year. Simultaneously, the tree trunk height of 5−25 m had a significantly positive correlation with July precipitation of the current year. (2) Quantification of the meteorological elements' influence on each tree trunk height through contribution rate shows that temperature is the primary element for tree trunk heights of 1.3 m and 5 m, and precipitation is the primary element for tree trunk heights of 10 m, 15 m, 20 m, and 25 m. (3) Moving average analysis showed a variation between the stable response to climate change at each tree trunk height, predominantly expressing that the correlation with the December temperature of the previous year was attenuated at each tree trunk height. The correlation with the June temperature of the current year was enhanced first and then attenuated. The negative correlation with the September temperature of the previous year was enhanced and that with September precipitation of the current year was also enhanced at tree trunk heights of 1.3 m, 5 m, 10 m, and 15 m. Furthermore, the correlation with January precipitation was attenuated at tree trunk heights of 10 m, 15 m, 20 m, and 25 m. By analyzing the relationship between radial growth and climate factors at different trunk heights, it is helpful to understand the difference between radial growth and climate response of trees at different trunk height, which provide reference for more accurate climate reconstruction.

Key words: *Picea schrenkiana*; tree-ring; trunk height; radial growth; climate response